

## О ПРЕДЕЛЬНОЙ МОЩНОСТИ ТРАНСФОРМАТОРА

И. Д. КУТЯВИН и Л. И. ДЕЛЬ

(Томский политехнический институт)

Несомненный интерес представляет определение предельной мощности силовых трансформаторов, исходя из транспортных ограничений или других условий. Эта задача может быть решена методом оптимизации геометрии трансформаторов путем минимизации выражения для веса выемной части при заданных ограничениях. Однако эта методика связана с трудностями ввиду сложности исследуемых выражений. Значительно проще решается эта задача путем максимизации выражения для мощности трансформатора при введении необходимых ограничений. Для удобства исследования воспользуемся выражением мощности стержня в *кв*а:

$$S_c = K \Delta B q_c q_m, \quad (1)$$

где  $\Delta$  — плотность тока в обмотке;  
 $B$  — индукция в стали стержня;  
 $q_c$  — площадь сечения стали стержня;  
 $q_m$  — полная площадь сечения материала обмотки.

$$K = 4,44 f \cdot 10^{-11}. \quad (2)$$

При этом могут быть приняты следующие ограничения:

- 1) ограничена удельная теплоотдача с поверхности обмотки,  $\epsilon$ ;
- 2) ограничено напряжение короткого замыкания,  $U_k$ ;
- 3) ограничены электродинамические усилия в обмотках;
- 4) ограничены транспортные габариты трансформатора;
- 5) ограничен транспортный вес.

В качестве ограничения по нагреву обмоток примем максимальную допустимую теплоотдачу с их поверхности  $\epsilon_m$  при выбранном способе охлаждения. Тогда уравнение теплового баланса поверхности катушки (для непрерывной катушечной, дисковой и винтовой обмоток) на один погонный сантиметр среднего витка [1]

$$2\epsilon_m (k_b b + k_y y) = \rho k_r \Delta^2 \frac{bxy}{x + i}; \quad (3)$$

где  $x$  и  $y$  — радиальная ширина и осевая высота меди элементарного проводника ( $y$  — является также осевой высотой катушки);  
 $i$  — изоляция элементарного проводника на две стороны;  
 $b$  — радиальная ширина сечения стороны катушки;  
 $\rho$  — удельное сопротивление материала обмотки;



$k_b$  и  $k_y$  — коэффициенты, учитывающие закрытые части поверхностей  $b$  и  $y$  изоляционными прокладками.

Выражение для коэффициента увеличения активного сопротивления материала обмотки из-за поверхностного эффекта [2] приводится к следующему виду:

$$k_r = 1 + \frac{c^2 b^2 x^4 y^2}{9(x+i)^2(y+b)^2}, \quad (4)$$

$$c = \pi f \frac{\mu}{\rho}; \quad (5)$$

где  $\delta$  — осевое расстояние между медью соседних катушек, состоящее из осевой ширины радиального охлаждения канала и изоляции катушки на две стороны;

$i$  — число периодов тока (Гц);  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-9}$ .

Введем еще обозначения:

$$\frac{k_b}{k_y} b + y = k_p b + y = P \text{ и } \frac{2\varepsilon_m k_y}{\rho} = \alpha \quad (6)$$

и найдем из (3) плотность тока:

$$\Delta = \sqrt{\frac{\alpha P(x+i)}{k_r b x y}}. \quad (7)$$

Для упрощения решения задачи приняты следующие допущения:  $i_1 = i_2 = i$ ;  $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon$ ;  $h_1 = h_2 = h$  и вытекающие отсюда равенства  $x_1 = x_2 = x$ ;  $y_1 = y_2 = y$  и  $b_1 = b_2 = b$ .

Не учтены добавочные потери на циркулирующие токи в меди обмоток в предположении идеальной транспозиции.

Не учтены добавочные потери в стальных конструкциях.

Площадь поперечного сечения меди обмотки:

$$q_m = m x y \frac{h}{y + \delta} = \frac{b x y h}{(x + y)(y + \delta)}, \quad (8)$$

где  $m$  — число элементарных проводников в катушке;

$h$  — осевая высота обмотки.

Площадь поперечного сечения стали стержня:

$$q_c = k_c \frac{\pi}{4} d^2, \quad (9)$$

где  $d$  — диаметр описывающего стержень круга;

$k_c$  — коэффициент заполнения сталью площади круга с диаметром  $d$ .

Тогда выражение мощности (1) с учетом (7) — (9):

$$S_c = KB \frac{k_c \pi}{4} d^2 h \sqrt{\alpha b} \sqrt{\frac{P x y}{k_r (x+i)(y+\delta)^2}}. \quad (10)$$

Здесь  $d$  и  $h$  определяются транспортными габаритами трансформатора. Поэтому мощность стержня зависит только от трех переменных  $b$ ,  $x$  и  $y$ . Предварительные исследования показали, что с ростом переменной  $b$  мощность  $S_c$  возрастает при всех конструктивных значениях  $b$ , а при некоторых значениях  $x$  и  $y$  выражение (10) имеет максимум. Это видно из рис. 1 и 2, на которых изображена зависимость

$$\varphi = \sqrt{\frac{P x y}{k_r (x+i)(y+\delta)^2}} \quad (11)$$



при  $b=10$ ;  $\delta=1$ ;  $k_{\Pi}=0,78$ ;  $i=0,01$ ;  $c=0,92$ . На рис. 1 показана зависимость  $\varphi(x, y)$  при  $y=0,5$ ; 1; 2; 4, а на рис. 2 — зависимость максимумов функции от  $y$ .

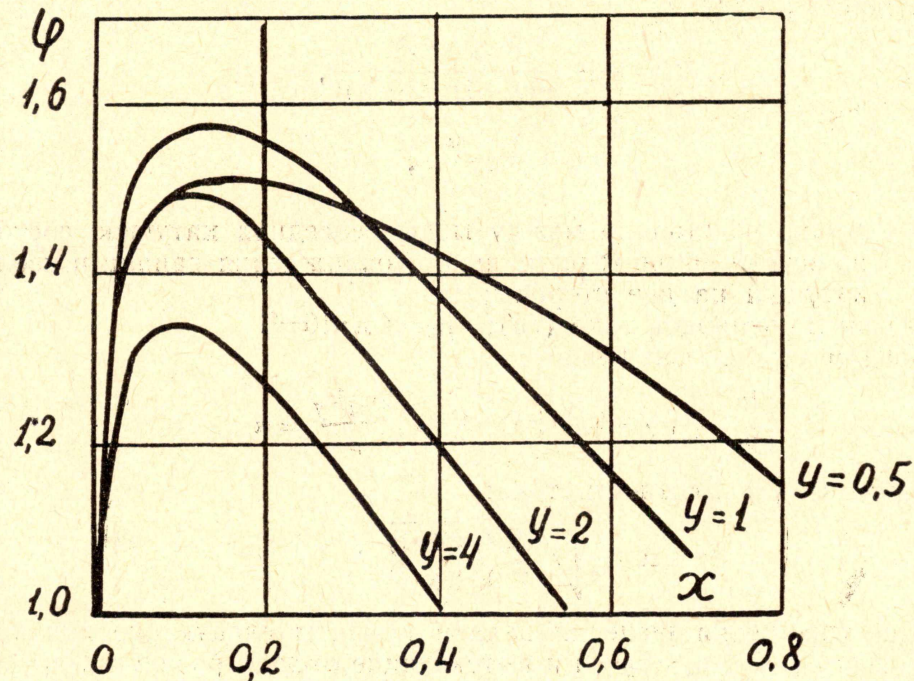


Рис. 1.

Для определения  $x$  и  $y$ , соответствующих максимуму функции, воспользуемся условием, что:

$$\frac{\partial S_c}{\partial x} = 0 \text{ и } \frac{\partial S_c}{\partial y} = 0, \quad (12)$$

В результате получаем два уравнения:

$$k_{\Gamma} i - x(x+i)k'_{\Gamma x} = 0; \quad (13)$$

$$k_{\Gamma} [\delta(k_{\Pi} b + 2y) - k_{\Pi} b y] - P y(y+\delta)k'_{\Gamma y} = 0, \quad (14)$$

где  $k'_{\Gamma x}$  и  $k'_{\Gamma y}$  — производные  $k_{\Gamma}$  по соответствующим переменным.

Совместное решение этих уравнений приводит к соотношениям:

$$\frac{3(k_{\Pi} b - \delta)}{k_{\Pi} c i b^2} = U_1 = \frac{v^2}{\sqrt{2v+3}}, \quad \text{где } v = \frac{x}{i}. \quad (15)$$

$$y = \frac{k_{\Pi} b \delta (x+i)}{i \delta + (x+2i)(k_{\Pi} b - 2\delta)}. \quad (16)$$

Уравнение (15) имеет четвертую степень относительно  $x$  и непосредственно не может быть решено. Однако критическое значение  $x$  легко определяется по кривой 1 рис. 3, если найти предварительно  $U_1$  из левой части (15). Кривая 1 построена для  $U_1(v)$  по правой части (15).

Если принятое значение  $y$  существенно отличается от найденного из (16), то оптимальное  $x$  определяется из уравнения (13) или по кривой 2 рис. 3, построенной по правой части выражения:

$$\frac{3(y+\delta)}{c b i y} = U_2 = \frac{v^2 \sqrt{2v+3}}{v+1}, \quad (17)$$

$U_2$  находится из левой части (17).



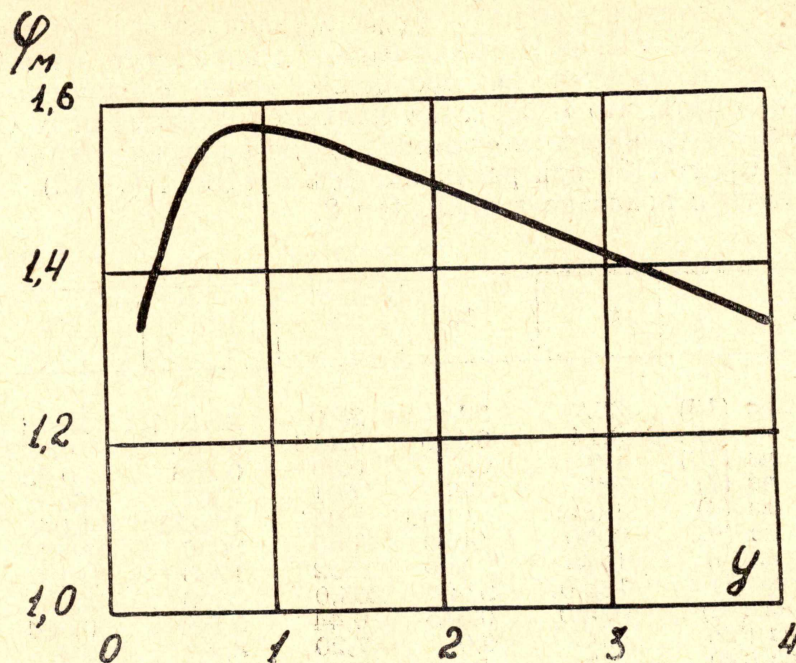


Рис. 2.

Как отмечалось выше, мощность  $S_c$  увеличивается с ростом  $b$ . Одновременно растет и напряжение короткого замыкания, определяемое выражением [1]:

$$U_p = \frac{2k_R \Delta q_m l_m \delta'}{3,33 B q_c h} = \frac{8k_R (d + 2\delta_{01} + 2b + \delta_{12}) (2b + 3\delta_{12})}{3,33 k_c B d^2} \sqrt{\frac{ab P_{xy}}{k_r (x+i)(y+\delta)^2}}, \quad (18)$$

где

$k_R$  — коэффициент Роговского;  
 $l_m$  и  $\delta'$  — средняя длина и приведенная ширина канала рассеяния;  
 $\delta_{01}$  и  $\delta_{12}$  — изоляционные расстояния от стержня до обмотки и между обмотками.

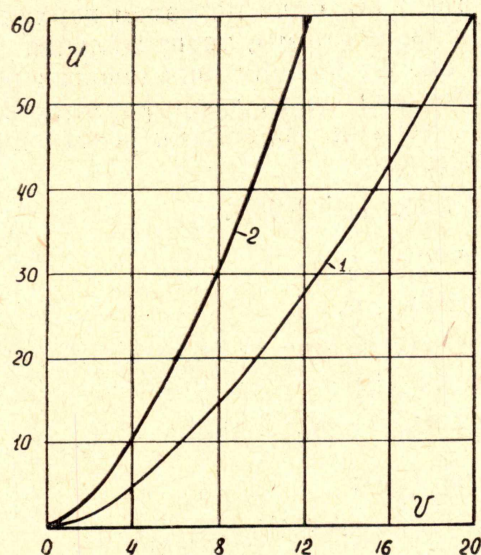


Рис. 3.



В связи с этим величина  $b$  будет ограничиваться допустимым напряжением  $U_p$ . Значение  $b$  можно было бы определить из (18), задавшись  $U_p$ , но это практически невозможно в виду сложности (18), особенно если учесть, что  $P$ ,  $k_r$ ,  $x$  и  $y$  являются функциями  $b$ . Однако задача решается сравнительно просто методом поиска, состоящим в определении  $U_p$  из (18) при различных  $b$  в пределах (7÷12). Подобное решение задачи показано в табл. 1 и 2.

Таблица 1

№ п.п	b		8	10	12	14	16	18
1	U <sub>1</sub>	из (15)	35,7	29,4	25,0	21,1	18,74	15,53
2	X <sub>0</sub>	по рис. 3	0,14	0,125	0,113	0,105	0,093	0,083
3	Y <sub>0</sub>	из (16)	1,0	0,93	0,89	0,856	0,83	0,809
4	Δ	из (7)	485	495	501	507	515	523
5	K <sub>r</sub>	из (4)	1,032	1,036	1,041	1,0453	1,045	1,041
6	q <sub>c</sub>	из (9)	9050	9050	9050	9050	9050	9050
7	q <sub>м</sub>	из (8)	1068	1290	1502	1718	1910	2100
8	S <sub>c</sub>	из (1)	182,0	224,0	265,0	306	346	386
9	I <sub>p</sub>	из (18)	0,259	0,345	0,44	0,546	0,664	0,791
10	Q <sub>м</sub>	из (32)	4,9	6,0	7,20	8,4	9,6	10,8
11	Q <sub>c1</sub>	из (30)	73	74	74	75	75	76
12	Q <sub>c2</sub>	из (30)	113	114	116	117	118	119
13	Q <sub>c3</sub>	из (30)	154	155	158	159	160	163
14	Q <sub>c4</sub>	из (30)	193	196	198	201	203	206
15	Q <sub>н1</sub>	из (31)	83	86	88	92	94	97
16	Q <sub>н2</sub>	из (31)	133	139	144	152	156	162
17	Q <sub>н3</sub>	из (31)	182	191	200	209	218	238
18	Q <sub>н4</sub>	из (31)	233	244	256	268	280	292
19	K <sub>мо</sub>	(из 34)	0,518	0,498	0,483	0,472	0,46	0,447

Ограничение размеров и мощности трансформаторов по электродинамической устойчивости может быть выполнено отбраковкой вариантов электродинамически неустойчивых при коротких замыканиях. При этом расчетный ток короткого замыкания для определения электродинамической устойчивости повышающих трансформаторов следовало бы определять с учетом сопротивления генераторов ввиду надежного соединения их с трансформаторами.

Ограничение наружных размеров трансформатора определяется допустимыми железнодорожными габаритами с учетом перевозки на специальном транспортере [3]. Если при этом верхняя часть бака будет выполнена трапециевидальной формы, то предельная высота груза будет 500 см и ширина 325 см. От внешних предельных размеров можно перейти к габаритам выемной части трансформатора, которые связаны с геометрическими размерами простыми соотношениями. Внешний диаметр наружной обмотки:

$$D_B = d + 2\delta_{01} + 4b + 2\delta_{12}. \quad (19)$$

Высота выемной части:

$$H_B = h + 2l_u + d, \quad (20)$$

где  $l_u$  — изоляционное расстояние от обмотки до ярма.

Диаметр стержня из (19):

$$d = D_B - 2\delta_{01} - 2\delta_{12} - 4b = A - 4b. \quad (21)$$

Высота обмотки из (20):

$$h = H_B - 2l_u - A + 4b = B + 4b. \quad (22)$$

Длина среднего витка обмоток стержня:

$$l_M = \pi(d + 2\delta_{01} + 2b + \delta_{12}) \quad (23)$$



Таблица 2

№ п.п		6	8	10	12	14	16	18
1	U <sub>1</sub> из (15)	3,4	2,8	2,43	2,12	1,865	1,68	
2	x <sub>0</sub> по рис. 3	0,33	0,29	0,27	0,243	0,226	0,215	
3	y <sub>0</sub> из (16)	1,14	1,035	0,974	0,93	0,89	0,866	
4	Δ из (7)	487	508	520	532	547	571	
5	K <sub>Г</sub> из (4)	1,11	1,114	1,126	1,128	1,132	1,141	
6	q <sub>с</sub> из (9)	9050	9050	9050	9050	9050	9050	
7	q <sub>м</sub> из (8)	843	974	1112	1244	1360	1482	
8	S <sub>с</sub> из (1)	145	174	203	232	261	297	
9	U <sub>р</sub> из (18)	0,20	0,27	0,34	0,42	0,50	0,61	
10	Q <sub>м</sub> из (32)	3,9	4,6	5,4	6,1	6,8	7,6	
11	Q <sub>с1</sub> из (30)	73	74	74	75	76	76	
12	Q <sub>с2</sub> из (30)	114	115	116	117	118	119	
13	Q <sub>с3</sub> из (30)	154	156	158	159	161	163	
14	Q <sub>с4</sub> из (30)	193	196	199	201	203	206	
15	Q <sub>н1</sub> из (31)	81	83	85	87	89	91	
16	Q <sub>н2</sub> из (31)	129	132	137	141	145	150	
17	Q <sub>н3</sub> из (31)	177	183	190	195	202	208	
18	Q <sub>н4</sub> из (31)	224	232	241	249	257	266	
19	K <sub>м0</sub> из (34)	0,409	0,378	0,36	0,331	0,326	0,313	

Длина стали сердечника, приведенная к сечению стержня, для трансформатора с одним обмотанным стержнем (броневой тип):

$$l_{c1} = 2(H_B + a_1), \quad (24)$$

где  $a_1$  — ширина окна с одной системой обмоток:

$$a_1 = \delta_{01} + 2b + \delta_{12} + \delta_{20}, \quad (25)$$

Для трансформатора с двумя обмотанными стержнями:

$$l_{c2} = 3H_B + 2a_1 + a_2, \quad (26)$$

где  $a_2$  — ширина окна с двумя системами обмоток:

$$a_2 = 2\delta_{01} + 4b + 2\delta_{12} + \delta_{22}, \quad (27)$$

Для трансформатора с тремя обмотанными стержнями:

$$l_{c3} = 4H_B + 2a_1 + 2a_2, \quad (28)$$

То же с четырьмя обмотанными стержнями:

$$l_{c4} = 5H_B + 2a_1 + 3a_2, \quad (29)$$

В табл. 1 и 2 приведена методика определения предельной мощности трансформатора при заданной высоте обмотки  $h=260$  и диаметре стержня  $d=120$  см (все размеры в сантиметрах).

Изоляционные расстояния для трансформатора 20/750 кВ приняты:  $\delta_{01}=5$ ;  $\delta_{12}=18$ ;  $\delta_{20}=e_{II}=38$ . Остальные общие данные  $E_M=0,30$ ;  $\rho=2,14 \cdot 10^{-6}$ ;  $k_y=0,9$ ;  $k_B=0,7$ ;  $k_c=0,8$ ;  $k_r=0,95$ ;  $B=17,5$  гс;  $f=50$  гц.

В пунктах 1—12 табл. 1 и 2 определены геометрические размеры и параметры трансформаторов предельной мощности. Табл. 1 составлена для  $i=0,01$  и  $\delta=0,8$ , а табл. 2 при  $i=0,1$  и  $\delta=1$ . В пункте 8 показана мощность трансформатора в мегавольтамперах. В пунктах 11—14 показан вес стали сердечника и зависимости от числа обмотанных стержней (индекс при  $Q_c$ ) и размера  $b$ . Вес стали определялся из выражения (при  $\gamma_c=7,6$ );

$$Q_c = \gamma_c l_c q_c. \quad (30)$$

В пунктах 15—18 приведен суммарный вес активных материалов (все веса в тоннах):

$$Q_n = Q_{cn} + Q_m 2n, \quad (31)$$

где  $n$  — число обмотанных стержней;



$Q_m$  — средний вес меди одной обмотки, определенный из выражения:

$$Q_m = \gamma_m q_m l_m. \quad (32)$$

Если удельная теплоотдача с поверхности обмоток  $\epsilon_1$  отличается от принятой для табл. 1 и 2  $\epsilon_m = 0,16$ , то плотность тока, мощность и напряжение  $U_p$  надо умножить на величину:

$$\sqrt{\frac{\epsilon_1}{\epsilon_m}} = \sqrt{\frac{\epsilon_1}{0,16}}. \quad (33)$$

Сравнение таблиц показывает, что снижение изоляции провода до 0,01 (применение эмалевой изоляции) снижает добавочные потери в обмотках с (11÷13) % до (3—4) % и повышает мощность трансформатора в (1,2÷1,3) раза. Применение эмалевой изоляции элементарных проводников для винтовой обмотки не должно встретить затруднений. Эмалевая изоляция может применяться также во всех катушечных обмотках для изоляции параллельных проводников. При этом витковая изоляция может быть выполнена полоской электрокартона или применением крайнего проводника с полной витковой изоляцией. Это приведет к резкому снижению средней расчетной толщины изоляции. Если катушка имеет 10 витков и 50 элементарных проводников, то 4 проводника можно взять с эмалевой изоляцией ( $i_1 = 0,01$ ) и один с повышенной бумажной ( $i_2 = 0,2$ ). Тогда средняя расчетная толщина изоляции будет:

$$i_{cp} = \frac{40 \cdot 0,01 + 10 \cdot 0,2}{50} = 0,048.$$

При выборе величины  $\delta$  предположено, что для междукатушечной изоляции большинства катушек достаточно масляного канала (0,8—0,9) см.

Исследования показали, что для трансформаторов существует оптимальный коэффициент заполнения медью площади сечения обмотки:

$$k_{mo} = \frac{x_0 y_0}{x_0 + i_1 (y_0 + \delta)}. \quad (34)$$

Величина этого коэффициента показана в пункте 21 табл. 1 и в пункте 13 табл. 2.

Анализ данных табл. 1 и 2 показывает, что имеется практическая возможность повышения предельной мощности трансформаторов до 600÷900 мва в единице.

Приведенная методика может быть использована для определения оптимальной геометрии трансформатора при заданной его мощности и напряжения короткого замыкания.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. И. Д. Кутявин, Г. В. Дель, В. П. Краснов. К технико-экономическому определению оптимальных размеров подстанционных трехфазных двухобмоточных трансформаторов большой мощности. Известия Томского политехнического института, т. 130, 1964.

2. Dietrich W. Auslegung von Transformatoren-wicklungen mit kleinstem Wirkwiderstand. «Elektrotechn. Z.» N 6. 1965.

3. В. Ш. Аншин, А. Г. Крайз. Сборка мощных трансформаторов. ГЭИ, 1961.